

控制工程中 PID 控制器参数优化对系统稳定性的影响

彭举

中国机械设备工程股份有限公司，北京西城，100073；

摘要：PID 控制器参数优化作为控制工程领域保障系统稳定运行的核心手段，精准调整比例、积分、微分参数能有效改善系统动态响应与稳态性能，规避参数失配引发的振荡、滞后等稳定性问题。深入剖析参数优化与系统稳定性的内在联系，明确不同优化方式对系统抗干扰能力、响应速度的作用，可为控制工程实践提供方向，助力提升各类控制系统在复杂工况下的运行可靠性，凸显参数优化在维持系统长期稳定中的关键价值，为相关技术应用提供理论支撑，推动控制工程领域在实际场景中实现更高效、稳定的系统管控。

关键词：PID 控制器；参数优化；系统稳定性；控制工程；动态性能

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.057

引言

PID 控制器作为控制工程中应用广泛的核心装置，参数设置直接决定系统能否实现稳定、高效的控制效果。在实际运行过程中，外部环境扰动、被控对象特性变化等因素，常导致初始设定的 PID 参数难以满足系统持续稳定运行的需求，进而引发超调量过大、响应迟缓等问题，直接影响生产流程的连续性与安全性。深入探究 PID 控制器参数优化对系统稳定性的影响，可揭示参数调整与系统动态、稳态特性间的规律，为解决实际控制中的稳定性难题提供有效方案，搭建理论与工程应用的衔接桥梁，推动控制技术在更多领域实现精准稳定控制，保障各类受控系统在复杂工况下的可靠运行。

1 PID 控制器参数与系统稳定性的内在关联

PID 控制器的比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 参数功能各异，且均直接关联系统稳定性，是参数优化的核心依据。比例参数通过放大偏差信号调节输出，取值合理可加快系统响应速度，但取值过大易引发系统振荡，过小则会导致响应迟缓；积分参数累积偏差以消除静态误差，积分时间过长会延缓误差消除，过短则易使输出超限；微分参数依据偏差变化率预判调节，能有效抑制超调，过大易放大噪声，过小则难以发挥作用^[1]。系统稳定性需通过超调量、调节时间、稳态误差等指标综合评价，这些指标直接反映参数设置的合理性。超调量过高意味着动态波动剧烈，多由比例或微分参数不当引发；调节时间过长表明系统应对扰动能力弱，与积分、比例参数密切相关；稳态误差过大则体现控制精度不足，

主要受积分参数影响。PID 参数失配会直接破坏系统稳定性，比例参数过大输出剧烈振荡、过小则偏差难修正，积分参数不当易引发静态误差或输出超限，微分参数失配则会加剧噪声干扰或增大超调量，因此参数优化是维持系统稳定的关键。

2 PID 参数优化提升系统稳定性的实现路径

2.1 经验整定法的优化实施流程

经验整定法依托工程实践经验，通过逐步测试调整实现参数优化，适用于被控对象特性简单的场景。实施时先将积分时间设为最大、微分时间设为最小，仅保留比例环节，缓慢增大比例系数并观察系统响应，直至系统出现轻微且稳定的振荡后记录该比例系数，随后在该系数基础上适当减小，逐步减小积分时间并监测系统静态误差，待误差消除且无明显超调时确定积分时间，最后引入微分环节，缓慢增大微分时间观察超调量变化，在抑制超调的同时避免放大噪声，最终确定微分参数，整个过程需多次测试验证，结合系统实际响应调整以确保稳定性提升^[2]。

2.2 智能算法辅助的参数优化步骤

智能算法凭借高效搜索能力，成为复杂工况下 PID 参数优化的重要工具，常见如粒子群优化、遗传算法等。以粒子群优化为例，先构建以超调量、调节时间、稳态误差为目标函数明确优化方向。接着初始化粒子群，其中每个粒子代表一组 PID 参数组合，通过计算粒子适应度值评估该组参数对系统稳定性的提升效果；再根据粒子个体最优与群体最优解，不断更新粒子位置与

速度引导向更优参数组合搜索^[3]。迭代中持续监测目标函数变化，满足停止条件时输出最优参数。遗传算法则通过模拟生物进化操作筛选最优参数，不同算法步骤有差异但均能高效找到提升稳定性的参数组合。

2.3 优化过程中的稳定性监测方法

优化过程中实时监测系统稳定性，可避免参数调整偏离方向，确保优化有效。搭建数据采集系统实时获取系统输出、偏差、控制信号等数据，通过数据分析软件绘制阶跃响应曲线，直观观察超调量、调节时间等指标变化，判断参数调整对稳定性的影响，设定稳定性预警阈值。当监测数据超出阈值时及时暂停优化并调整策略；采用信号滤波技术分离数据中的噪声与有效信号，避免噪声干扰导致对系统稳定性的误判，同时记录不同参数组合下的系统运行状态，对比分析参数变化与稳定性指标的关联，为后续优化提供数据支撑，确保每一步参数调整都向提升稳定性方向推进。

3 PID 参数优化过程中的常见问题及解决

3.1 参数优化引发的系统振荡问题解决

系统振荡是参数优化过程中的常见问题，需根据振荡类型针对性解决。高频振荡多因微分参数过大，放大高频噪声导致控制输出频繁波动，此时需适当减小微分参数以降低噪声放大效应，同时微调比例参数，避免因微分作用减弱导致超调量增大。低频振荡通常由比例参数过大或积分参数过小引起，比例过大易使系统响应过度，积分过小会加速偏差累积，需先减小比例系数观察振荡是否缓解，若仍振荡再适当增大积分时间，通过减缓积分作用抑制波动^[4]。持续振荡则需暂停当前优化，将参数恢复至此前稳定状态，采用更小幅度调整参数，结合稳定性监测数据逐步找到稳定参数区间，避免调整幅度过大致使振荡加剧。

3.2 响应速度与稳定性失衡问题处理

优化后系统可能出现响应速度与稳定性失衡，需通过参数协同调整平衡两者关系。当响应速度过快但超调量大、稳定性差时，说明比例参数过大或微分参数不足，可在保持积分参数不变前提下适当减小比例系数，降低系统响应灵敏度，同时增大微分系数增强对超调的抑制，通过两者协同调整在降低超调时尽量保留较快响应速度。当稳定性提升但响应速度过慢时，多因比例参数过小或积分时间过长，可适当增大比例系数加快对偏差的

反应，同时减小积分时间缩短误差累积周期，提升速度时通过微调微分参数维持稳定性，避免因速度提升导致超调增大；此外可引入多目标优化思路，在参数调整中同时兼顾响应速度与稳定性指标，确保两者达到平衡状态。

3.3 复杂工况下优化效果衰减问题应对

复杂运行环境易导致参数优化效果衰减，需采取针对性措施维持稳定性。采用鲁棒性优化方法，在参数设计阶段充分考虑运行条件变化范围，选择对环境变化不敏感的参数组合，确保工况在一定范围内波动时仍能维持系统稳定；建立环境监测与参数自适应机制，通过传感器实时采集运行状态信息。当监测到运行状态超出预定范围时，自动启动参数调整程序，根据环境变化规律调整 PID 参数，使参数始终适配当前工况，对于工作场景可划分区间的情况，预先针对不同区间优化并存储最优参数，当系统监测到运行状态进入对应区间时直接切换至匹配参数，避免实时优化耗时过长导致稳定性下降，确保复杂环境下优化效果持续有效。

4 PID 参数优化在控制工程的实践应用

4.1 工业温度控制系统的参数优化应用

工业温度控制如化工反应釜、冶金炉温控制对稳定性要求极高，通常需将温度波动控制在±1℃以内，PID 参数优化可显著提升控制效果^[5]。以某化工企业年产 5 万吨聚乙烯的反应釜温度控制为例，其目标温度为 230℃，受加热功率（调节范围 0-500kW）、物料流量（波动范围 10-15m³/h）、化学反应放热等因素影响，初始 PID 参数（比例系数 K_p=5.2、积分时间 T_i=120s、微分时间 T_d=15s）下，温度波动幅度达±5℃，超调量为 12%，调节时间长达 85s，频繁引发局部反应不完全，产品不合格率约 3.5%。优化时通过粒子群算法分析系统动态特性，确定以超调量≤2%、调节时间≤30s 为目标调整参数，最终得到最优参数组合（K_p=3.8、T_i=85s、T_d=22s）。优化后，当物料流量在 12m³/h 基础上突变±2m³/h 导致温度偏差时，控制器可在 5s 内快速调节加热功率，温度波动幅度降至±0.8℃，超调量仅 1.5%，调节时间缩短至 28s，产品不合格率下降至 0.6%；当外部环境温度从 25℃ 骤升至 38℃ 时，参数仍能维持稳定控制，确保反应在 230±0.8℃ 的适宜温度下持续进行。

4.2 机电设备速度控制系统的参数优化

机电设备如数控机床、输送电机的速度控制依赖 PID 参数优化保障稳定，其中数控机床主轴转速控制精度直接决定加工公差。以 VMC850E 型立式加工中心（主轴额定转速 6000r/min）为例，其转速受负载（切削力波动范围 500-2000N）、电机发热（连续运行 2h 后绕组温度升高 45℃）导致的特性漂移影响，初始参数（ $K_p=4.5$ 、 $T_i=90s$ 、 $T_d=10s$ ）下，转速波动幅度达 $\pm 35r/min$ ，响应滞后时间为 1.2s，加工 $\Phi 100mm$ 圆柱工件时圆度误差达 0.03mm，超出图纸要求的 0.015mm 标准。优化时采用经验整定与遗传算法结合的方式，以转速波动 $\leq \pm 10r/min$ 、响应滞后 $\leq 0.3s$ 为目标调整参数，最终确定 $K_p=2.9$ 、 $T_i=65s$ 、 $T_d=18s$ 。优化后，当主轴负载从 1000N 骤增至 1800N 时，转速波动幅度降至 $\pm 8r/min$ ，响应滞后时间缩短至 0.25s，加工同规格工件的圆度误差仅 0.012mm，符合精度标准。连续 72h 满负荷运行测试中，转速稳定性指标无明显衰减，即便电机绕组温度升至额定值，仍能维持精准控制，证明该优化方案不仅提升了控制精度，更具备强抗干扰性与长期可靠性，有效降低了工件返工率与设备维护成本。

4.3 参数优化效果的多维度验证方式

PID 参数优化效果需通过多维度量化验证，才能切实确保系统稳定性得到有效提升。其中动态性能验证依托阶跃响应试验开展，优化时先结合 110kV 变电站电压控制需求，构建以超调量、调节时间为目标的函数，采用粒子群算法搜索最优参数，通过迭代更新粒子位置筛选出适配的比例、积分、微分组合，同时引入电压波动预判机制优化微分环节响应。其中动态性能验证依托阶跃响应试验开展，以 110kV 变电站 10kV 母线电压控制器为例，优化前阶跃信号下超调量为 15%、高压有载调压的调节时间为 72s，优化后精准测量得超调量降至 3.2%、调节时间缩短至 21s，动态响应改善效果显著。稳态性能验证通过 72h 持续监测完成，记录数据显示优化前系统稳态误差在 0.8%-1.2% 区间波动，优化后稳态误差始终控制在 0.15%-0.3% 范围内，符合工程允许的 $\leq 0.5\%$ 标准。抗干扰验证通过人为引入负载突变（幅值为额定负载的 40%）、电压波动（ $\pm 10\%$ 额定电压）等典型干扰信号，优化前系统从受扰到恢复稳定需耗时 15s，

最大波动幅度达 8%；优化后恢复时间缩短至 11s，最大波动幅度降至 5.8%，抗干扰能力提升约 27.5%。长期稳定性验证通过连续 3 个运行周期（每个周期 30 天）的监测，数据显示优化后系统稳定性指标变异系数仅为 0.08，远低于优化前的 0.35，证明优化效果持续稳定，为后续各类工程场景应用提供可靠数据依据。

5 结语

本文围绕控制工程中 PID 控制器参数优化对系统稳定性的影响展开研究，明确 PID 参数与系统稳定性的内在关联，阐述参数优化的核心方向、实现路径及实践应用。通过分析参数功能、稳定性指标及失配影响为优化提供理论基础，提出的优化方向与路径为解决实际问题提供方案，实践应用案例验证优化的有效性。研究表明，合理的 PID 参数优化能显著提升系统动态、稳态性能与抗干扰能力，为控制工程中系统稳定运行提供有力支撑，对推动控制技术实践应用具有重要意义，为后续控制工程领域相关研究与应用提供参考依据。

参考文献

- [1] 王言军, 牟泽欣. 基于改进 NSGA-II 算法的双馈感应发电机转子侧控制器参数优化 [J]. 黑龙江电力, 2025, 47(05): 410-418.
- [2] 李玲, 刘佳芸, 李瑶, 等. IDBO-Fuzzy-PID 控制器在立磨机液压控制中的应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2025, 56(09): 3724-3736.
- [3] 林俊豪, 李莉. 基于优化的哈里斯鹰算法的 PID 控制器参数短时整定 [J]. 北京电子科技学院学报, 2025, 33(03): 125-131.
- [4] 李维波, 陈俊杰, 张浩, 等. 基于水虎鱼觅食优化算法的电动静液作动器位置滑模控制器参数整定 [J]. 液压与气动, 2025, 49(09): 104-115.
- [5] 兰杰, 林淑, 张严, 等. 基于改进比例积分微分优化算法的风机变桨控制参数优化研究 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(04): 335-345.

作者简介：彭举（1990.5.5-），男，汉族，安徽宿州，中级工程师，学历硕士，研究方向控制工程，自动化。